

**М. Н. Иванов, С. М. Спирёв, Ю. Н. Смыков**  
**ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»**

**(г. Новосибирск, Россия)**

**В. В. Рыжаков, А. А. Шемшурин**

**БУ ВО ХМАО-Югры «Сургутский государственный университет»**

**(г. Сургут, Россия)**

## **ГАРМОНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

В электрических сетях 0,4 кВ систем электроснабжения объектов с нелинейными электрическими нагрузками наблюдаются значительные искажения форм кривых напряжений. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых фазных напряжений в этих системах достигают 10–15 % и превышают требования ГОСТ 32144–2013. Причём спектр высших гармонических составляющих напряжения представлен в основном 5, 7, 11 и 13 гармониками. Такой режим работы систем электроснабжения обостряет проблему электромагнитной совместимости технических средств. К этому же следует добавить, что в автономных электроэнергетических системах с ограниченными мощностями трёхфазных коротких замыканий наблюдается ещё и вибрация рабочих механизмов при некоторых режимах работы электромеханических преобразователей.

В рамках одной статьи не представляется возможным проанализировать все виды воздействия гармоник на технические средства. Поэтому ограничиваемся рассмотрением проблемы вибрации электромеханических преобразователей. В качестве объекта исследования выбран наиболее распространённый электромеханический преобразователь – асинхронный электродвигатель.

**Магнитное поле.** Каждая гармоника напряжения создаёт в электродвигателе магнитное поле, вращающееся с частотой [1]

$$n_{1k} = \frac{60f_k}{p} = \left(\frac{60f_1}{p}\right)k = kn_1, \quad (1)$$

где  $n_1$  – синхронная угловая скорость двигателя, обусловленная основной (первой) гармоникой);

$k$  – номер гармоники;

$p$  – число пар полюсов;  $f_1 = 50$  Гц;  $f_k = kf_1$

Исключение составляют третья гармоника и другие гармоники, кратные трём, которые создают пульсирующее поле.

Направление вращения магнитного поля, созданного высшей гармоникой тока, зависит от номера этой гармоники. Пятая и одиннадцатая гармоники магнитного потока будут вращаться в сторону, противоположную направлению вращения основного магнитного поля (поля первой гармоники). Седьмая и тринадцатая гармоника магнитного поля вращаются согласно с основным магнитным полем [1].

**Потери мощности.** При работе асинхронного двигателя в условиях несинусоидального напряжения возникают добавочные потери, обусловленные высшими гармониками тока в цепях статора и ротора. Эти добавочные потери (Вт) можно определить по формуле [1]

$$\Delta P_{\text{Ад},k} = \Delta P_{\text{М,Н}} \sum_{i=2}^k K_{\partial,k} \approx 0,2 \Delta P_{\text{НОМ}} \sum_{i=2}^k K_{\partial,k}; \quad (2)$$

где  $\Delta P_{M, H}$  – номинальные потери мощности в меди статора, Вт;

$\Delta P_{\text{НОМ}}$  – суммарные номинальные потери электродвигателя, Вт;

$K_{\partial, k}$  – коэффициент учитывающий возрастание потерь в меди за счёт  $k$ -й гармоники;

$k$  – номер последней учитываемой гармоники.

Расчёт добавочных потерь по формуле (2) от действия на электродвигатель 5, 7, 11 и 13 гармоник показал, что  $\Delta P_{A, D} \approx 0,04 \Delta P_{\text{НОМ}}$ . Величина этих потерь не может изменить тепловой режим работы асинхронного электродвигателя.

**Магнитные потери в стали от высших гармоник.** Обычно магнитные потери невелики, так как амплитуды высших гармоник магнитного поля малы. Поскольку для высших гармоник электрическая машина находится в режиме короткого замыкания, приближённо можно принять, что ЭДС статора  $E_k \approx 0,5 \cdot U_k$  [1]. Тогда, относительное значение магнитного потока  $k$ -й гармоники  $\Phi_{km}$  по сравнению с магнитным потоком основной гармоники  $\Phi_{1m}$ , составит

$$\Phi_{km} / \Phi_{1m} \approx E_k f_1 / (U_1 f_k) \approx 0,5 \left( \frac{U_k}{U_1} \right) \left( \frac{f_1}{f_k} \right). \quad (3)$$

В первом приближении магнитные потери в стали можно оценить соотношением

$$\frac{\Delta P_{M, k}}{\Delta P_{M1}} = \frac{0,25}{k^2 \sqrt{k}}, \quad (4)$$

где  $P_{M1}$ ,  $P_{Mk}$  – соответственно магнитные потери в стали, обусловленные 1-й и  $k$ -й гармониками магнитного потока, Вт.

Расчёты добавочных потерь в цепях статора и ротора по формуле (2) и магнитных потерь в стали электродвигателя по формуле (4) показывают, что эти потери не велики даже при значительных искажениях формы кривой напряжения в питающей сети 0,4-10 кВ, когда коэффициент искажения составляет 10–15%. Например, магнитные потери стали от пятой гармоники составляют от 0,5 % потерь от основной гармоники, от седьмой гармоники – 0,19 %, от одиннадцатой – 0,09 % и от тринадцатой – 0,002 %. Эти потери способствуют повышению температуры изоляции электродвигателей.

**Вращающие и тормозящие моменты высших гармоник.** Эти электромагнитные моменты по своей природе аналогичны основному электромагнитному моменту и отличаются от последнего лишь тем, что они связаны с взаимодействием высших гармоник магнитного поля статора с токами, индуцированными ими в обмотках ротора. Их также называют добавочными асинхронными моментами от высших гармонических составляющих [1].

Электромагнитный момент (Н·м) от действия высшей гармоники можно приближённо оценить, если принять  $S_k \approx 1$

$$M_k \approx \frac{M_n}{k^4}; \quad (5)$$

Скольжение для высших гармоник можно рассчитать по формуле [1]

$$S_k = \frac{n_k \pm n}{n_k} = \frac{kn_1 \pm n_1(1-S_1)}{kn_1} = (k \pm (1 - S_1))/k; \quad (6)$$

где  $S_1$  – скольжение от действия первой гармоники магнитного поля.

Реальный спектр высших гармонических составляющих напряжения в электрических сетях 0,4 кВ обуславливается в основном работой по схеме Ларионова мощных трёхфазных выпрямителей, которые генерируют канонический ряд высших гар-

моник: 5, 7, 11, 13 и т.д. В связи с этим 5-я и 7-я гармоники магнитного поля создают наиболее значимые электромагнитные моменты. Поэтому ограничимся анализом влияния на режим работы асинхронного двигателя только этих гармоник.

Учитывая это, гармонические составляющие магнитного поля статора образуют асинхронные моменты, и результирующий асинхронный электромагнитный момент находится в виде суммы

$$M = M_1 + M_5 + M_7; \quad (7)$$

График функции  $M_1 = f(S_1)$  приведён на рисунке 1, а; соответственно  $M_7 = f(S_7)$  – на рисунке 1, б;  $M_5 = f(S_5)$  – на рисунке 1, в. Полная графическая интерпретация формулы (7) приведена на рисунке 1, а.

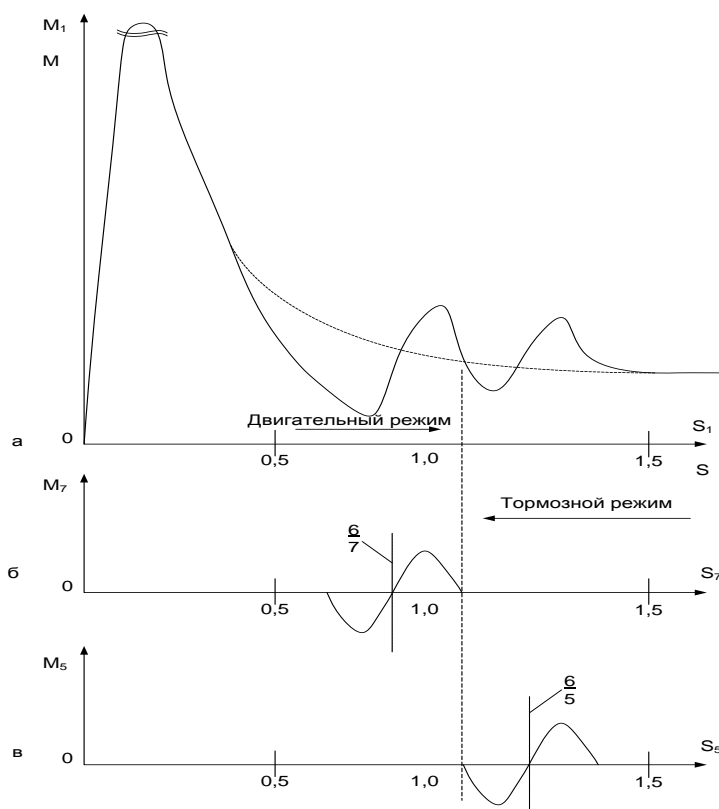


Рисунок 1 – Вращающие и тормозящие моменты от высших гармоник

Видно, что асинхронные электромагнитные моменты от высших гармоник искажают кривую основного электромагнитного момента. Наибольшие искажения наблюдаются в зоне малых скоростей вращения, где добавочные асинхронные моменты, связанные с высшими гармониками, максимальны. Провалы в кривой результирующего момента изменить режим работы электродвигателя.

**Колебательные моменты.** В результате взаимодействия токов одних частот с магнитными потоками других частот возникают знакопеременные моменты, частота которых значительно выше основной частоты, а среднее значение равно нулю. Общее количество колебательных моментов очень велико, так как взаимодействие возникает между всеми гармониками [1].

Амплитуды колебательных моментов не зависят от величины нагрузки на валу асинхронного электродвигателя, в то же время основной электромагнитный момент

определяется статическим моментом на валу. Поэтому при небольшой нагрузке в режиме, близком к холостому ходу, амплитуда одного из колебательных моментов может превзойти величину основного электромагнитного момента двигателя. Это явление может вызвать неравномерность вращения ротора, особенно заметное при малых частотах вращения. Возникает вибрация электропривода.

**Вывод.** Колебательные моменты, которые обусловлены взаимодействием токов частот с магнитными потоками других частот, но зависят от величины нагрузки на валу асинхронного двигателя. Амплитуда колебательного момента от взаимодействия 5-й и 7-й гармоник составляет 11–19 % от номинального электромагнитного момента, от взаимодействия 11-й и 13-й составляет 1–2 %. Поэтому при небольшой нагрузке на валу в режиме, близком к холостому ходу, амплитуда колебательного момента может превысить величину основного электромагнитного момента двигателя. Это может вызвать вибрацию электродвигателей.

#### Список использованных источников

Брускин, Д.Э. Электрические машины. Ч. 1. Учебник для вузов / Д.Э. Брускин – М.: Высшая школа, 1979. – 228 с.